МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE

УДК 669.1:66.04

Научная статья

https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-1-58-65

Зарождение мартенсита напряжения в состоянии предмартенситной неустойчивости решетки

Ю.В. Долгачев ✉, **В.Н. Пустовойт**, **Ю.М. Вернигоров**

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

✉ yuridol@mail.ru

EDN: KQSXLQ

Аннотация

Введение. Комбинированное влияние на процесс фазового превращения, предполагающее сочетание термической обработки с внешним воздействием, является актуальным технологическим решением для получения необходимых свойств стальной продукции. При закалке стали в постоянном магнитном поле напряженностью 1–2 МА/м наблюдается образование мартенсита при более высоких температурах. Помимо этого, по сравнению с обычной закалкой, происходят изменения в структуре и свойствах. Подобные эффекты не могут объясняться только с термодинамических позиций, так как предполагаемый сдвиг температуры равновесия между аустенитом и мартенситом в магнитном поле такой напряженности не превышает 4–8 °С. Для объяснения эффектов, возникающих при закалке в магнитном поле, предлагается рассмотреть особенности мартенситного превращения в быстрорежущей стали при воздействии внешним магнитным полем в температурном интервале сверхпластичности аустенита. Целью данной работы стало выявление особенностей мартенситного превращения в присутствии постоянного магнитного поля в стали с учетом явлений, возникающих в предмартенситном состоянии.

Материалы и методы. Использовались образцы стали марки Р6М5. Исследование особенностей мартенситного превращения осуществляли потенциометрическим методом электросопротивления. Данные фиксировались с помощью аналого-цифрового преобразователя L–CARD E14–440 с использованием программного комплекса LGraph2. Нагрев образца проводился проходящим током. Образец размещался в межполюсном пространстве лабораторного электромагнита открытого типа ФЛ-1, который обеспечивал создание магнитного поля напряженностью 1,2 МА/м.

Результаты исследования. На полученных дифференцированных зависимостях присутствовали аномалии электросопротивления (низкотемпературные пики) при температуре, соответствующей появлению ферромагнитной фазы в результате мартенситного превращения. В магнитном поле развитие мартенситного превращения начинается при более высокой температуре, что не может найти объяснения с термодинамических позиций. Таким образом, наблюдали образование мартенсита напряжения в микрообъемах аустенита с ферромагнитным упорядочением, которые воспринимают энергию внешнего поля через магнитострикционные напряжения. В условиях сверхпластичного аустенита такие напряжения оказываются достаточными для инициирования сдвигового превращения. Определен минимально возможный размер флуктуаций неустойчивости решетки (1,372 нм).

Обсуждение и заключение. Воздействие магнитным полем при закалке приводит к усилению процессов своеобразного магнитного расслоения аустенита. При температурах, близких к началу мартенситного превращения, имеющиеся области магнитной неоднородности накладываются на эффекты от явления неустойчивости кристаллической решетки перед мартенситным превращением. В температурном интервале Мд-Мн, когда аустенит проявляет сверхпластичность, существенно облегчается образование мартенсита напряжения в микрообъемах аустенита с ферромагнитным упорядочением.

Ключевые слова: мартенсит напряжения, магнитное поле, сверхпластичность, неустойчивость решетки, сталь, закалка

Благодарности. Авторы выражают благодарность рецензентам, чья критическая оценка представленных материалов и высказанные предложения по их совершенствованию, способствовали значительному повышению качества настоящей статьи.

Для цитирования. Долгачев Ю.В., Пустовойт В.Н., Вернигоров Ю.М. Зарождение мартенсита напряжения в состоянии предмартенситной неустойчивости решетки. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don).* 2024;24(1):58–65. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-1-58-65

Research article

Stress Martensite Nucleation in a State of Premartensitic Lattice Instability

Yuri V. Dolgachev ✉, **Viktor N. Pustovoit**, **Yuri M. Vernigorov**
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
✉ yuridol@mail.ru

Abstract

Introduction. The combined effect on the phase transformation process, involving a combination of heat treatment and external action, is a major technology solution for obtaining the required properties of steel products. When hardening steel in a constant magnetic field with a strength of 1–2 MA/m, martensite formation is observed at higher temperatures. In addition, when compared to conventional hardening, there are changes in structure and properties. Such effects cannot be explained only in terms of thermodynamics, since the expected shift in the equilibrium temperature between austenite and martensite in a magnetic field of such strength does not exceed 4–8°C. To explain the effects that occur during hardening in a magnetic field, it is proposed to consider the features of martensitic transformation in highspeed steel when exposed to an external magnetic field in the temperature range of austenite superplasticity. This research was aimed at identifying the features of martensitic transformation in the presence of a constant magnetic field in steel with account for the phenomena occurring in the premartensitic state.

Materials and Methods. Samples made of steel R6M5 were used. Characteristics of the martensitic transformation were studied using the potentiometric method of electrical resistance. The data were recorded using an L-CARD E14-440 analog-to-digital converter with the LGraph2 software package. The sample was heated by passing current. The sample was placed in the interpolar space of an open-type laboratory electromagnet FL-1, which provided the creation of a magnetic field with a strength of 1.2 MA/m.

Results. The obtained differentiated dependences were characterized by electrical resistance anomalies (low-temperature peaks) at a temperature corresponding to the appearance of a ferromagnetic phase as a result of martensitic transformation. In a magnetic field, the development of martensitic transformation began at a higher temperature, which could not be explained in terms of thermodynamics. Thus, the formation of stress martensite was observed in microvolumes of austenite with ferromagnetic ordering, which perceived the energy of the external field through magnetostrictive stresses. Under conditions of superplastic austenite, such stresses were sufficient to initiate shear transformation. The minimum possible size of lattice instability fluctuations (1.372 nm) was determined.

Discussion and Conclusion. Exposure to a magnetic field under hardening intensified the processes of some magnetic decomposition of austenite. At temperatures close to the beginning of the martensitic transformation, the existing areas of magnetic inhomogeneity were superimposed on the effects of the phenomenon of instability of the crystal lattice. In the temperature range Md-Mn, when austenite exhibited superplasticity, the formation of stress martensite in microvolumes of austenite with ferromagnetic ordering was significantly facilitated.

Keywords: stress martensite, magnetic field, superplasticity, lattice instability, steel, hardening

Acknowledgements. The authors appreciate the reviewers, whose critical assessment of the submitted materials and suggestions helped to significantly improve the quality of this article.

For citation. Dolgachev YuV, Pustovoit VN, Vernigorov YuM. Stress Martensite Nucleation in a State of Premartensitic Lattice Instability. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don).* 2024;24(1):58–65. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-1-58-65

Введение. Перед началом мартенситного превращения в металлах и сплавах обнаруживается неустойчивость кристаллической решетки [1], выражающаяся в специфическом предмартенситном состоянии исходной решетки [2]. Термодинамический анализ состояния исходной фазы перед точкой $M_н$ [3] показывает возможность возникновения отдельных микрообластей, имеющих свой ближний порядок в расположении атомов. Такие микрообласти сохраняют свой атомный порядок только вблизи ядра флуктуации. На расстоянии от него не возникает явных границ между фазами, порядок размывается постепенно. Экспериментально описываемые микрообласти проявляются в виде эффектов диффузионного рассеяния при рентгеновской дифракции. Наличием областей с ближним атомным порядком объясняется уменьшение вблизи точки $M_н$ упругих констант и сближение структур [4], участвующих в превращении фаз.

В случае, когда присутствует приложенное внешнее напряжение, то мартенситное превращение может быть инициировано деформацией при температуре выше точки $М_н$. Максимальная температура, при которой деформация исходной фазы вызывает образование мартенсита, обозначается точкой $М_д$. Установлено [5], что в интервале температур $М_д – М_н$ наблюдается максимум пластичности, что обусловлено проявлением сверхпластичности, связанной с закалочным переходом. Наложение постоянного магнитного поля в данных условиях вызывает появление вынужденной магнитострикциии и соответствующих напряжений в нанообластях аустенита, имеющих ферромагнитный порядок [6], что индуцирует появление кристаллов закалочной фазы, получившей название мартенсита напряжения (по аналогии с мартенситом деформации) [7]. Наложение постоянного магнитного поля изменяет исходное магнитное состояние аустенита [8], увеличивая число и размеры ферромагнитноупорядоченных кластеров, которые являются возможными местами зарождения ферромагнитной α-фазы [6]. Таким образом, в температурной области $М_д – М_н$ происходит интеграция магнитного и ряда особых структурных состояний, что безусловно представляет интерес для изучения.

В данной работе ставилась цель изучить особенности мартенситного превращения в присутствии постоянного магнитного поля в стали с учетом явлений, возникающих в предмартенситном состоянии.

Материалы и методы. При проведении работ использовались образцы стали марки Р6М5, в отношении которой имеются сведения о проявлении сверхпластичности [5], связанной с фазовым превращением [9]. Химический состав контролировался на оптико-эмиссионном спектрометре Q8Magellan (Bruker). Средний состав образцов из одной плавки представлен в таблице 1.

Таблица 1

Среднее содержание элементов в образцах, %

C	*Si*	*Mn*	*S*	*P*	*Cr*	*Mo*	*V*	*W*
0,844	0,421	0,420	0,019	0,023	3,946	4,918	2,018	5,922

Для анализа протекания закалочного превращения без поля и с наложением магнитного поля применялся потенциометрический метод резистометрии [10], так как изменения в структуре сплава отражаются на измеряемых значениях ρ с довольно высокой чувствительностью. Хотя количественное определение соотношений между превращающимися фазами затруднительно, установление точек старта и финиша перехода может быть произведено достаточно точно. Имеется высокая чувствительность применяемого метода к появлению ферромагнитной фазы (при фазовых превращениях 1-го или 2-го рода), что проявляется в аномальном поведении на кривой ρ из-за электронных взаимодействий на «*s*» и «*d*» подуровнях [11], определяющих наличие спонтанной намагниченности [12].

В качестве температурного датчика использовалась термопара типа S (ТПП). Термопара приваривалась точечной сваркой в центральной части образца в одну точку для исключения возникновения побочных напряжений при раздельной приварке из-за прохождения тока через образец в процессе измерения. Данные фиксировались с помощью аналого-цифрового преобразователя L-CARD E14–440 с использованием программного комплекса LGraph2. Нагрев образца проводился проходящим током от автотрансформатора РНО-250–5.

Образец размещался в межполюсном пространстве (рис. 1). Электромагнит открытого типа (ФЛ-1) обеспечивал создание магнитного поля напряженностью 1,2 МА/м. При проведении эксперимента без поля питание электромагнита отключалось, а полюса перемыкались пластиной из АРМКО-железа.

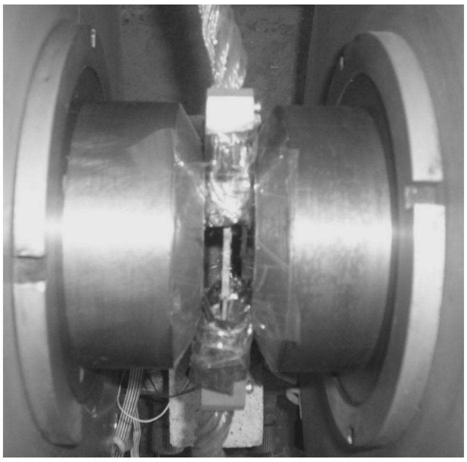


Рис. 1. Образец с подсоединёнными медными контактами в межполюсном пространстве магнита

http://vestnik-donstu.ru

Полученные экспериментальные данные (ρ(τ) и T(τ) на рис. 2), записанные с частотой дискретизации 400 кГц, подвергались численному дифференцированию и аппроксимации для получения функции $d\rho / dT(T)$, которая отражает характерные аномалии при появлении ферромагнитной фазы.

Результаты исследования. Показанные на рис. 2 первичные зависимости ρ(τ) и T(τ) уже демонстрируют сдвиг аномалий, отвечающих фазовому превращению, в высокотемпературную область при наложении постоянного магнитного поля.

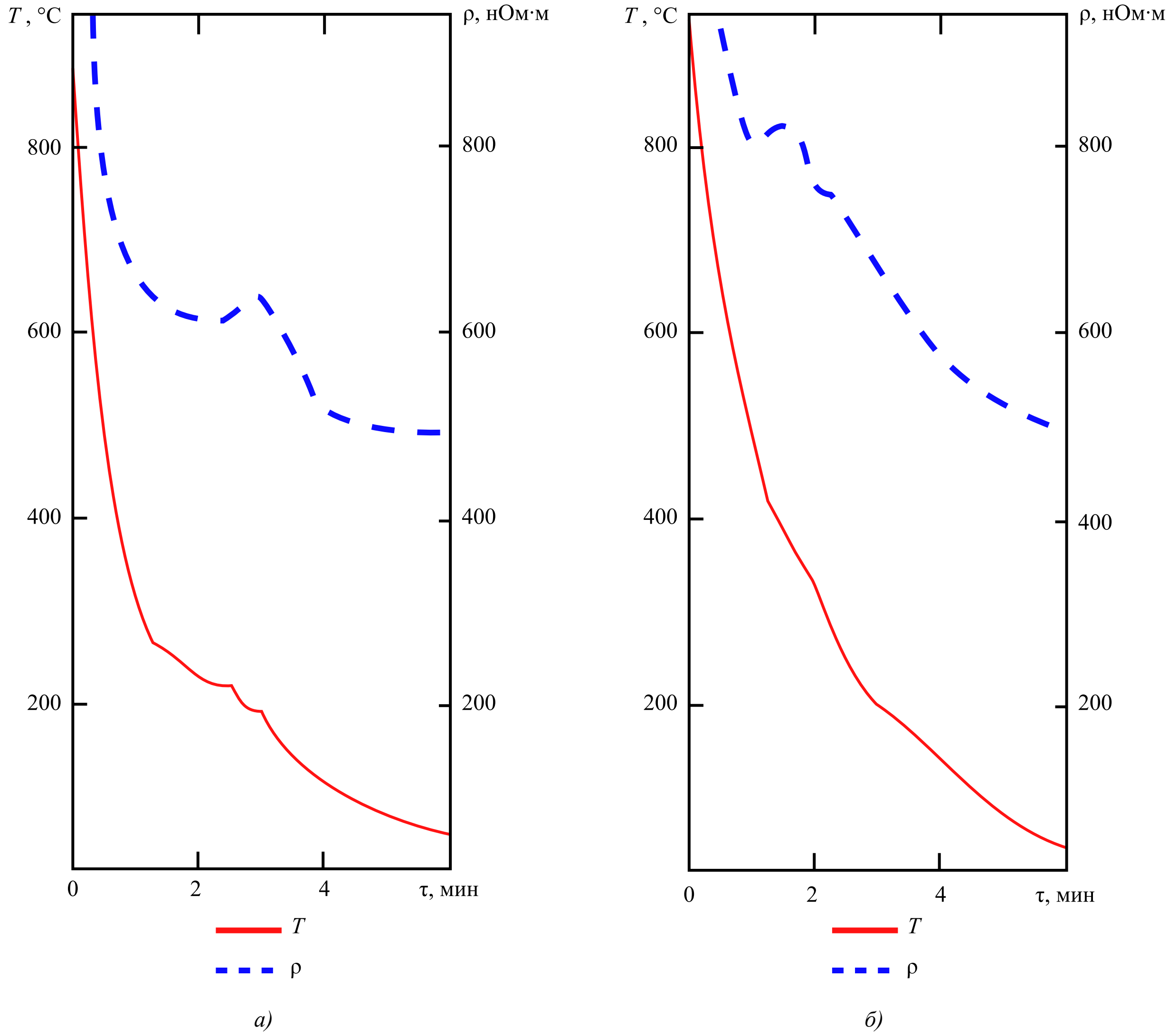


Рис. 2. Зависимости ρ(τ) и T(τ) для стали Р6М5 при охлаждении:
а — без поля; *б* — в магнитном поле 1,2 МА/м

Согласно справочным данным [13], для образцов стали Р6М5, соответствующих химическому составу, указанному в таблице 1, температура 140 °С отвечает началу мартенситного превращения. Это подтверждается полученными в результате дифференцирования данными на рис. 3, которые иллюстрируют характерные черты анализируемого превращения.

Образование фазы, обладающей ферромагнетизмом, отвечает на рис. 3 появлению пика при низких температурах, что позволяет зафиксировать начало мартенситной реакции. Для случая обработки с наложением магнитного поля старт образования мартенситной фазы отмечается при температуре 185 °С, что не поддается объяснению исключительно с точки зрения изменения термодинамических потенциалов фаз. Для магнитного поля напряженностью 1,2 МА/м эффект смещения равновесной температуры составляет ~ 4,5 °С [14]. Можно утверждать, что наложение магнитного поля в температурном диапазоне сверхпластичности приводит к образованию мартенсита напряжения выше известной для данной стали точки старта превращения в результате вынужденной магнитострикции в нанообластях с ближним магнитным порядком в аустените. Возникающие при этом в аустенитной матрице напряжения составляют около 10 МПа [15], что в условиях неустойчивости кристаллической решетки способствует запуску фазовой реакции.

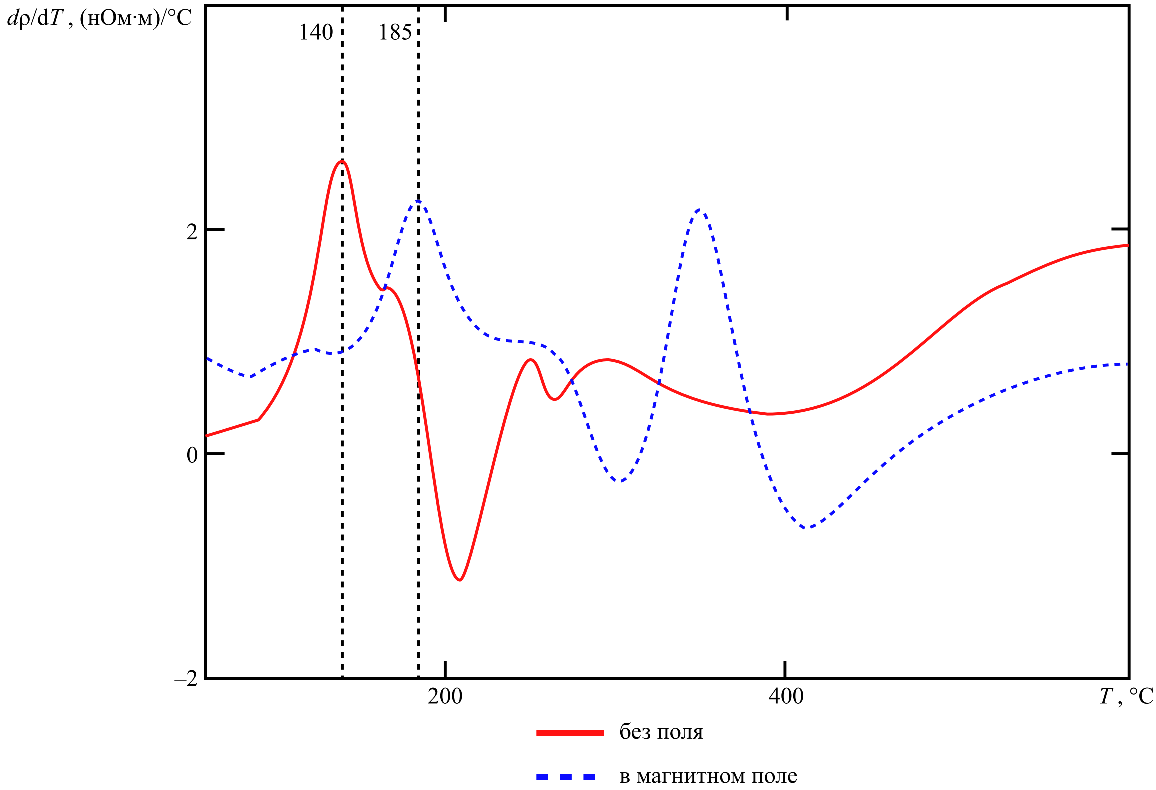


Рис. 3. Результаты дифференцирования экспериментальных данных, полученных при охлаждении стали Р6М5:
1 — без поля; 2 — в магнитном поле напряженностью 1,2 МА/м

Явление, связанное с возникновением неустойчивости кристаллической решётки исходной фазы, с приближением к точке перехода отражается на дифференцированных зависимостях в виде пика в высокотемпературной области кривой. Появление этого пика при охлаждении указывает на приближение сверхпластичного состояния аустенита. Воздействие внешнего магнитного поля усиливает магнитное расслоение аустенита [8], способствуя увеличению количества и размеров ферромагнитных нанокластеров [15], что и вызывает сдвиг данного пика к более высоким температурам. В локальных областях с однонаправленными спинами возникают анизотропные поля, вносящие упругие искажения из-за того, что энергия намагничиванияя отличается по разным направлениям. Это понижает устойчивость решётки γ-фазы. Определённый в работе [8] средний диаметр ферромагнитного нанокластера составляет для данной напряженности поля около 1,7 нм, что сопоставимо с длинами волн электронов, может их отклонять и, соответственно, приводить к появлению искажений на кривых. Полученные результаты свидетельствуют о наличии неоднородности в магнитном состоянии аустенита и о том, что при наложении внешнего магнитного поля данная гетерогенность усиливается.

Для превращения при закалке характерен бездиффузионный сдвиговый механизм атомной перестройки, поэтому внешнее воздействие увеличивает движущую силу перехода. В состоянии, когда перед точкой $M_н$ решётка исходной фазы становится неустойчивой, в локальных областях возникают спонтанные атомные смещения (подготавливающие решётку к γ→α переходу), где магнитострикционные напряжения могут сыграть роль триггера для старта превращения.

Условия, описывающие возможность флуктуаций атомных смещений в предмартенситном состоянии, были рассмотрены в [16]. Вид функции, минимумы которой отвечают переходному состоянию, выводился на основе картин диффузных рассеяний и существующих вариантов перестройки кристаллической решётки. Частоты колебаний и параметры ангармонизма выражались через модули упругости, значения которых определяли вариант перестройки.

Анализ предполагает, что микрообласти атомных смещений имеют форму пластин из плотноупакованных плоскостей, которые могут испытывать сдвиг. Выражение для оценки минимально возможного размера флуктуации H может быть выведено через матричные коэффициенты упругости:

$$H \cong 6d\sqrt{\frac{c_{11}+c_{44}-2c'}{2c'+c_{44}}}, \qquad (1)$$

где d — межплоскостное расстояние; $c' = 1/2(c_{11} - c_{12})$ — константа упругости; c_{11}, c_{12}, c_{44} — коэффициенты упругости.

Значения для расчёта по формуле (1) были подобраны для температуры мартенситного превращения в стали Р6М5. Оценка периода решетки *a* произведена с учетом указаний в работе [17]. Межплоскостное расстояния определено для случая ГЦК решетки, когда первыми отражающими плоскостями является семейство плоскостей {111}, имеющее максимальное межплоскостное расстояние $d = \frac{a}{\sqrt{3}} = 2{,}1\,\overset{\circ}{A}$. Исходя из данных об упругих характеристиках стали Р6М5 [9], были определены коэффициенты и константа упругости с помощью известных соотношений [18]. Результаты расчёта по зависимости (1) позволяют оценить минимальный диаметр области, где может возникать неустойчивость $H \cong 1{,}372$ нм, что соизмеримо с со средним диаметром ферромагнитного кластера в аустените.

Обсуждение и заключение. Можно предположить следующий сценарий развития мартенситного превращения. Выше точки $M_н$ в γ-фазе существуют области с ферромагнитным упорядочением [15]. Если в этих местах или вблизи них происходит наложение волн атомных смещений, то, при наличии внешнего магнитного поля, вынужденная магнитострикция способна в таких условиях воздействовать на поля упругих сил в кристаллической решетке и понижать энергетический барьер для образования критического зародыша мартенсита.

Экспериментальные результаты указывают на существование магнитной гетерогенности в состоянии γ-фазы, степень которой оказывает влияние на протекание мартенситного превращения. Наложение постоянного магнитного поля в процессе закалочного охлаждения усиливает имеющуюся магнитную неоднородность в аустените. Вблизи точки $M_н$ явление неустойчивости решётки, в сочетании с магнитострикционными эффектами от поля, инициируют возникновение кристаллов мартенсита напряжения. Таким образом, может быть объяснён эффект интенсификации мартенситного превращения при закалке в магнитном поле напряженностью 1–2 МА/м, что имеет большое значение для практики термической обработки стали.

Результаты работы указывают на то, что, воздействуя магнитным полем в процессе закалочного охлаждения, можно достичь большей полноты протекания мартенситной реакции, уменьшая количество остаточного аустенита, а раннее образование мартенсита напряжения обеспечивает более длительное его присутствие в области повышенных температур, способствуя протеканию отпускных процессов непосредственно при закалке.

Список литературы / References

1. Yongmei M Jin, Yu U Wang, Yang Ren. Theory and Experimental Evidence of Phonon Domains and Their Roles in Pre-Martensitic Phenomena. *npj Computational Materials.* 2015;1(1):15002. URL: https://www.nature.com/articles/npjcompumats20152 (accessed: 20.11.2023).

2. Muslov SA, Khachin VN, Pushin VG, Chumlyakov YuI. Elastic Properties and Structure of Alloys TiNi-TiFe prior Martensitic Transformations. *Letters on Materials.* 2015;5(4):420–423. URL: https://lettersonmaterials.com/Upload/Journals/794/420-4231.pdf (accessed: 20.11.2023).

3. Кондратьев В.В., Пушин В.Г., Романова Р.Р., Тяпкин Ю.Д. Упругие свойства и устойчивость ГЦК решеток вблизи температуры мартенситного превращения. *Физика металлов и металловедение.* 1977;44(3):468–479.

Kondratyev VV, Pushin VG, Romanova RR, Tyapkin YuD. Elastic Properties and Stability of FCC Lattices near the Martensitic Transformation Temperature. *The Physics of Metals and Metallography.* 1977;44(3):468–479. (In Russ.).

4. Эстрин Э.И. Устойчивость решеток и мартенситные превращения. В: *Труды междунар. конф. ICOMAT-77 «Мартенситные превращения».* Киев: Наукова думка; 1978. С. 29–33.

Estrin EI. Lattice Stability and Martensitic Transformations. In: *Proc. Int. Conf. "Martensitic Transformations".* Kiev: Naukova dumka; 1978. P. 29–33. (In Russ.).

5. Гуляев А.П. *Сверхпластичность стали*. Москва: Металлургия; 1982. 56 с.

Gulyaev AP. *Superplasticity of Steel*. Moscow: Metallurgiya; 1982. 56 p. (In Russ.).

6. Pustovoit VN, Dolgachev YuV. Ferromagnetically Ordered Clusters in Austenite as the Areas of Martensite Formation. *Emerging Materials Research.* 2017;6(2):249–253. https://doi.org/10.1680/jemmr.17.00042

7. Фролова А.В., Царенко Ю.В., Рубаник мл. В.В., Рубаник В.В., Столяров В.В. Деформационное поведение в сплавах с мартенситным превращением под внешними воздействиями. *Известия Российской академии наук. Серия физическая.* 2019;83(10):1410–1415. https://doi.org/10.1134/S0367676519100107

Frolova AV, Tsarenko YuV, Rubanik VV Jr., Rubanik VV, Stolyarov VV. Tensile Strain of Alloys with the Martensitic Transformation under the External Impact. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics.* 2019;83(10):1289–1293. https://doi.org/10.1134/S0367676519100107

8. Dolgachev YuV, Pustovoit VN. The Model of Austenite Structure State Taking into Account Fluctuations of Magnetic Nature. *CIS Iron and Steel Review.* 2022;24(2):74–78. URL: https://rudmet.net/media/articles/Article_CIS_2022_24_pp.74-78.pdf (accessed: 20.11.2023).

9. Гвоздев А.Е. *Производство заготовок быстрорежущего инструмента в условиях сверхпластичности.* Москва: Машиностроение; 1992. 176 с.

Gvozdev AE. *Production of Blanks of High-Speed Tools under Conditions of Superplasticity.* Moscow: Mashinostroenie; 1992. 176 p. (In Russ.).

10. Черепин В.Т. *Экспериментальная техника в физическом металловедении*. Киев: Техника; 1968. 279 с. URL: https://search.rsl.ru/ru/record/01006388994?ysclid=lozixgfkxj355220445 (дата обращения: 20.11.2023).

Cherepin VT. *Experimental Technique in Physical Metallurgy*. Kiev: Tekhnika; 1968. 279 p. URL: https://search.rsl.ru/ru/record/01006388994?ysclid=lozixgfkxj355220445 (accessed: 20.11.2023) (In Russ.).

11. Вонсовский С.В. *Магнетизм: магнитные свойства диа-, пара-, ферро-, антиферро- и ферримагнетиков.* Москва: Наука; 1971. 1032 с. URL: https://search.rsl.ru/ru/record/01007305776?ysclid=lozipmaxya147070803 (дата обращения: 20.11.2023).

Vonsovskiy SV. *Magnetism: Magnetic Properties of Dia-, Para-, Ferro-, Antiferro-, and Ferrimagnets.* Moscow: Nauka; 1971. 1032 p. URL: https://search.rsl.ru/ru/record/01007305776?ysclid=lozipmaxya147070803 (accessed: 20.11.2023) (In Russ.).

12. Лившиц Б.Г., Крапошин В.С., Линецкий Я.Л. *Физические свойства металлов и сплавов*. Москва: Металлургия; 1980. 320 с.

Livshits BG, Kraposhin VS, Linetskii YaL. *Physical Properties of Metals and Alloys*. Moscow: Metallurgiya; 1980. 320 p. (In Russ.).

13. Попова Л.Е., Попов А.А. *Диаграммы превращения аустенита в сталях и бета-раствора в сплавах титана.* 3-е изд., перераб. и доп. Москва: Металлургия; 1991. 411 с.

Popova LE, Popov AA. *Diagrams of the Transformation of Austenite in Steels and beta Solution in Titanium Alloys.* 3rd ed., reprint. and add. Moscow: Metallurgiya; 1991. 411 p. (In Russ.).

14. Кривоглаз М.А., Садовский В.Д., Смирнов Л.В., Фокина Е.А. *Закалка стали в магнитном поле.* Монография. Москва: Наука; 1977. 120 с. URL: https://www.imp.uran.ru/?q=ru/content/zakalka-stali-v-magnitnom-pole (дата обращения: 20.11.2023).

Krivoglaz MA, Sadovskiy VD, Smirnov LV, Fokina EA. *Hardening of Steel in a Magnetic Field.* Monograph. Moscow: Nauka; 1977. 120 p. URL: https://www.imp.uran.ru/?q=ru/content/zakalka-stali-v-magnitnom-pole (accessed: 20.11.2023) (In Russ.).

15. Пустовойт В.Н., Долгачев Ю.В. *Магнитная гетерогенность аустенита и превращения в сталях.* Монография. Кудрякова О.В. (ред.) Москва: Ай Пи Ар Медиа; 2022. 190 с. https://doi.org/10.23682/117033

Pustovoit VN, Dolgachev YuV. *Magnetic Heterogeneity of Austenite and Transformations in Steels.* Monograph. OV Kudryakova (ed). Moscow: IPR Media; 2022. 190 p. https://doi.org/10.23682/117033 (In Russ.).

16. Кондратьев В.В., Тяпкин Ю.Д. Упругие свойства и квазистатические смещения атомов вблизи точки мартенситного превращения. В: *Труды междунар. конф. ICOMAT-77 «Мартенситные превращения».* Киев: Наукова думка; 1978. С. 43–46. URL: https://search.rsl.ru/ru/record/01007789971?ysclid=loziaf1a8v964754252 (дата обращения: 20.11.2023).

Kondratyev VV, Tyapkin YuD. Elastic Properties and Quasi-Static Displacements of Atoms near the Point of Martensitic Transformation. In: *Proc. Int. Conf. "Martensitic Transformations"*. Kiev: Naukova dumka; 1978. P. 43–46. URL: https://search.rsl.ru/ru/record/01007789971?ysclid=loziaf1a8v964754252 (accessed: 20.11.2023) (In Russ.).

17. Seki I, Nagata K. Lattice Constant of Iron and Austenite Including Its Supersaturation Phase of Carbon. *ISIJ International.* 2005;45(12):1789–1794. https://doi.org/10.2355/isijinternational.45.1789

18. Елманов Г.Н., Залужный А.Г., Скрытный В.И., Смирнов Е.А., Перлович Ю.А., Яльцев В.Н. *Физическое материаловедение: Т.1. Физика твердого тела.* 3-е изд., перераб. Москва: Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»; 2021. 764 с.

Elmanov GN, Zaluzhnyi AG, Skrytnyi VI, Smirnov EA, Perlovich YuA, Yal'tsev VN. *Physical Materials Science: Vol. 1. Solid State Physics.* 3rd ed., reprint. Moscow: National Research Nuclear University MEPHI; 2021. 764 p. (In Russ.).

Об авторах:

Юрий Вячиславович Долгачев, кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и технологии металлов Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код: 2774-5346, ORCID, ScopusID, ResearcherID, yuridol@mail.ru

Виктор Николаевич Пустовойт, доктор технических наук, профессор кафедры материаловедения и технологии металлов Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код: 7222-6100, ORCID, ScopusID, Researcher ID, pustovoyt45@gmail.com

Юрий Михайлович Вернигоров, доктор технических наук, профессор кафедры физики Донского государственного технического университета, (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID, ScopusID, jvernigorov@donstu.ru

Заявленный вклад авторов:

Ю.В. Долгачев — подготовка образцов для исследования, получение экспериментальных данных, проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов.

В.Н. Пустовойт — формирование основной концепции, цели и задач исследования, научное руководство, доработка текста, корректировка выводов.

Ю.М. Вернигоров — анализ результатов исследований, редактирование текста.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила в редакцию 23.12.2023
Поступила после рецензирования 19.01.2024
Принята к публикации 24.01.2024

About the Authors:

Yuri V. Dolgachev, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Materials Science and Technology of Metals Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), SPIN-code: 2774-5346, ORCID, ScopusID, ResearcherID, yuridol@mail.ru

Viktor N. Pustovoit, Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Materials Science and Technology of Metals Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), SPIN-code: 7222-6100, ORCID, ScopusID, Researcher ID, pustovoyt45@gmail.com

Yuri M. Vernigorov, Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Physics Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ORCID, ScopusID, jvernigorov@donstu.ru

Claimed contributorship:

YuV Dolgachev: preparation of samples for research, obtaining experimental data, calculations, text preparation, formulation of conclusions.

VN Pustovoit: basic concept formulation, research objectives and tasks, academic advising, revision of the text, correction of the conclusions.

YuM Vernigorov: analysis of the research results, the text revision.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

Received 23.12.2023
Revised 19.01.2024
Accepted 24.01.2024